

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření velmi malých magnetických polí
Measuring of The Very-Low Magnetic Fields

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Pícha**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Měření velmi slabých magnetických polí**
Measuring of the Very-Low Magnetic Fields

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor: Základní principy elektromagnetického pole a magnetických obvodů, magnetické vlastnosti materiálů, snímače pro měření magnetických polí.
- 2) Problematika velmi slabých magnetických polí a principy jejich měření.
- 3) Experimentální zjišťování rozložení magnetického pole v okolí feromagnetických prvků.
- 4) Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


Draxler, K.: Magnetické prvky a měření, CVUT, Praha, 1999
Trnka, Z., Dufek, M., Hrabák, J.: Magnetická měření, SNTL, Praha, 1966
Brož, J.: Moderní problémy feromagnetismu, Academia, Praha, 1962
Dědek, L.: Teorie elektromagnetického pole, VUT, Brno, 1990
Haňka, L.: Teorie elektromagnetického pole, SNTL, Praha, 1975
firemní katalogy a prospekty

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Marek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 4. 5. 2012


.....
Ondřej Pícha

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce p. Ing. Martinu Markovi, Ph.D. za pomoc a cenné rady při zpracování této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o měření velmi malých magnetických polí. První část obsahuje základní vztahy v magnetismu, veličiny a jednotky. Krátce se také věnuje geomagnetickému poli. Dále práce pojednává o vlastnostech a druzích magnetických materiálů. V další části se věnuji principům, vlastnostem a využitím senzorů pro měření magnetických polí. Předposlední část obsahuje principy, používané materiály a příklady konstrukce magnetického stínění. Následuje vyhodnocení dat z měření rozložení magnetického pole v okolí feromagnetické soustavy.

Klíčová slova

Měření polí, geomagnetické pole, magnetismus, magnetometry, fluxgate, AMR, cívka, Hallovy senzory, měřicí sondy, rozložení magnetického pole, magnetické materiály, magnetické stínění, stínící komora

Abstract

The topic of this baccalaureate thesis is measuring of very low magnetic fields. The first part focuses on theoretical terms like consist of basics relations in magnetism, Earth geomagnetic field, quantities and units of measurement, and on different kinds and characteristic of magnetic materials. In the next part I devote to principles, characteristic and the use of sensors in measuring magnetic fields. Then this baccalaureate thesis includes principles, commonly used materials and examples of construction of magnetic shielding. The last part is evaluating data from measurement of distribution of magnetic field near shielding chamber.

Key words

Measuring of magnetic fields, geomagnetic field, magnetism, magnetometers, fluxgate, AMR, coil, Hall sensors, measurement probes, distribution of magnetic field, magnetic materials, magnetic shielding, shielding chamber

Seznam použitých značek

Značka	Popis	Jednotka
AMR	anizotropní magnetorezistence	
As	arsen	
U_{mc}	celkové magnetické napětí reluktance	A
Sn	cín	
t	čas	s
l	délka	m
E	elektrické pole	$V \cdot m^{-1}$
Q	elektrický náboj	C
I	elektrický proud	A
ψ	Elektrický tok	$V \cdot m$
Ga	galium	
GMR	gigantická magnetorezistence	
R_H	Hallova konstanta	$\Omega \cdot m \cdot T^{-1}$
Al	Hliník	
Cr	chrom	
In	indium	
D	indukce elektrického pole	$C \cdot m^{-2}$
B_i	indukce uvnitř	T
B_o	indukce v okolí	T
u_i	indukované napětí	V
E	intenzita elektrického pole	$V \cdot m^{-1}$
H	Intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
H_l	intenzita na délce proudové dráhy	$A \cdot m^{-1}$
Co	kobalt	
H_c	koercitivita	$A \cdot m^{-1}$
G	konstanta tvaru stínění	-
π	Ludolfovo číslo	-
B	magnetická indukce	T
J	magnetická polarizace	T
G_m	magnetická vodivost (permeance)	H
U_m	Magnetické napětí	A
Rm	magnetický odpor (reluktance)	H^{-1}
ϕ	magnetický tok	Wb
M	magnetizace	$A \cdot m^{-1}$
F_m	magnetomotorická síla	A
B_m	maximální hodnota indukce	T
Cu	Měď	
Mo	molybden	
I_{AC}	napájecí proud můstku	A

Ni	nikl	
B_n	normálová složka indukce	N
B_{1n}	normálová složka indukce 1	T
B_{2n}	normálová složka indukce 2	T
H_{1n}	normálová složka intenzity 1	$A \cdot m^{-1}$
H_{2n}	normálová složka intenzity 2	$A \cdot m^{-1}$
ρ	objemová hustota elektrického náboje	$C \cdot m^{-3}$
MnO	oxid mangatý	
Py	permalloy	
μ	permeabilita	$H \cdot m^{-1}$
μ_0	permeabilita vakua	$H \cdot m^{-1}$
Pt	platina	
S	plocha	m^2
S_c	plocha průřezu cívky	m^2
N	počet závitů	-
N	počet závitů cívky	-
r	poloměr	m
J	proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
D	průměr stínění	m
μ_r	relativní permeabilita	-
B_r	remanence	T
ΔR	rozdíl maximálního a minimálního odporu	Ω
v	rychlost	$m \cdot s^{-1}$
H_s	saturační intenzita	$A \cdot m^{-1}$
F	síla	N
U_s	střední hodnota indukovaného napětí	V
Ag	Stříbro	
$SQUID$	superconducting quantum interference device	
H_{1t}	tečná složka intenzity 1	$A \cdot m^{-1}$
H_{2t}	tečná složka intenzity 2	$A \cdot m^{-1}$
d	tloušťka	m
t_s	tloušťka stěny stínění	m
α	úhel	°
ω	úhlová rychlost	s^{-1}
W	wolfram	
Au	Zlato	
Fe	železo	

Obsah

1	Úvod	1
2	Magnetické veličiny jednotky a vztahy	2
2.1	Magnetická indukce	3
2.2	Intenzita magnetického pole	3
2.3	Magnetický tok	3
2.4	Magnetomotorická síla	3
2.5	Materiálové rovnice	4
2.6	Magnetizace a magnetická polarizace	4
2.7	Magnetizační křivka	4
2.8	Biot-Savartův zákon	5
2.9	Lorenzova síla	6
3	Řešení magnetických obvodů	7
3.1	Základní vztahy pro řešení magnetických obvodů	7
3.2	Náhradní schéma magnetických obvodů	8
4	Magnetické pole země	9
4.1	Vznik magnetického pole země	9
4.2	Rozložení geomagnetického pole	9
5	Magnetické materiály	11
5.1	Feromagnetické látky	12
5.1.1	Magneticky měkké materiály	12
5.1.2	Magneticky tvrdé materiály	13
6	Magnetické senzory a přístroje	15
6.1	Hallovy senzory	16
6.2	Anizotropní magnetorezistory	17
6.3	Indukční senzory	18
6.3.1	Měřicí cívka	18
6.3.2	Rotační cívka	19
6.3.3	Feromagnetická cívka fluxgate	19
6.4	Rezonanční senzory	20
7	Magnetické stínění	21
7.1	Magnetické pole na rozhraní dvou látek	21
7.2	Konstrukce magnetického stínění	22
7.2.1	Orientace stínění vůči vnějšímu poli	23
7.2.2	Vliv permeability materiálu	23
7.2.3	Vliv tvaru stínění, vícevrstvé stínění	23
7.2.4	Zhotovení ohybů a spojů, nehomogenity ve stínícím obvodu	24
7.2.5	Žihání, demagnetizace	25
8	Měření rozložení magnetického pole v okolí feromagnetické soustavy	26
8.1	Měřicí přístroj	26
8.2	Měřicí přípravek	27

8.3	Měřený objekt.....	28
8.4	Měření	28
8.4.1	Měřicí body, postup měření.....	28
8.4.2	Měření rozložení pole bez komory (jen přípravek)	29
8.4.3	Měření rozložení pole na jednolitě komoře.....	30
8.4.4	Měření rozložení pole na svařené komoře, porovnání komor	31
8.5	Zhodnocení.....	33
8.5.1	Měření rozložení pole bez komory (jen přípravek)	33
8.5.2	Měření rozložení pole na jednolitě komoře.....	33
8.5.3	Porovnání stínících vlastností komor	33
9	Závěr.....	34
10	Seznam použité literatury.....	35
11	Seznam příloh.....	37

1 Úvod

Magnetismus jako takový, je člověku znám po stovky generací, lidé jej úspěšně využívali a dodnes využívají k určování polohy pomocí kompasu. S postupnou elektrifikací a nástupem indukčních strojů nabývaly jevy spojené s magnetismem na významu. Koneckonců jsou magnetické a elektrické pole neoddělitelně provázány.

Technika dnešní doby se nejen zkvalitňuje, zpřesňuje, ale hlavně se stále rozrůstá a to oběma směry – od obrovských objemů dat v informatice až například po stále pokročilejší nanotechnologii. Se zvyšující se miniaturizací a přesností různých aplikací, začínají hrát svůj význam i magnetická pole malých velikostí. Pro lepší pochopení problematiky je nutné magnetické pole zmapovat - změřit. Úkol je to velmi nesnadný, ať už kvůli samotnému rozsahu velikostí magnetického pole, nebo kvůli problematice výroby velmi přesných senzorů.

Úkolem této práce je experimentálně zjistit rozložení magnetického pole v okolí feromagnetické soustavy. Touto soustavou je stínící komora typového elektronového mikroskopu. Pro toto měření je nezbytné seznámit se s teorií magnetického pole. Dále s magnetickými materiály a jejich vlastnostmi, vyráběnými snímači pro měření slabých magnetických polí a v neposlední řadě s principy magnetického stínění. Tato teorie je v práci zahrnuta v několika kapitolách.

Pro samotné měření bylo dále nutné navrhnout postup měření, zvolit vhodný měřicí přístroj a vytvořit měřicí přípravek. Výsledkem tohoto měření by měly být charakteristiky popisující rozložení magnetického pole, ze kterých bude možné určit magnetické vlastnosti stínící komory.

2 Magnetické veličiny jednotky a vztahy

V roce 1861 James Clerk Maxwell sestavil z pokusů vyplývající rovnice shrnující poznatky elektromagnetismu a představující základní teorii makroskopického elektromagnetického pole. Tyto rovnice se dají zapsat v integrálním a v diferenciálním tvaru.

Integrální tvar:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d\psi}{dt} \quad (2.1)$$

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (2.3)$$

$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.4)$$

Diferenciální tvar

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (2.7)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.8)$$

Kde

- \vec{B} je magnetická indukce
- \vec{D} je indukce elektrického pole
- \vec{E} je intenzita elektrického pole
- \vec{H} je intenzita magnetického pole
- I je elektrický proud
- \vec{J} je proudová hustota
- Q je elektrický náboj
- S je plocha
- ϕ je magnetický tok
- ρ je objemová hustota elektrického náboje
- Ψ je elektrický tok

Tyto rovnice jsou analyticky řešitelné jen v malém množství případů, v praxi je pro jejich řešení třeba využít vhodné numerické metody a počítač. [1], [5]

2.1 Magnetická indukce

Magnetická indukce se definuje jako síla působící na vodič, který je procházen elektrickým proudem I . Jedná se o vektorovou veličinu.

$$\vec{F} = I \cdot [l \times \vec{B}] \quad (\text{N}; \text{A}, \text{m}, \text{T}) \quad (2.9)$$

Jednotka magnetické indukce je odvozena z jednotek SI a je jí 1T (Tesla). V soustavě CGSM byl jednotkou indukce 1G (Gauss) = 10^{-4} T

[1], [2]

2.2 Intenzita magnetického pole

Z I. Maxwellovy rovnice (2.1) definujeme intenzitu magnetického pole, podle které je ve vzdálenosti r od přímého velmi dlouhého vodiče s proudem I intenzita magnetického pole definována jako:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A}, \text{m}) \quad (2.10)$$

Jednotkou intenzity magnetického pole je $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. V soustavě CGSM byl jednotkou 1 Oe (Oersted).

[2]

2.3 Magnetický tok

Magnetický tok definujeme jako tok vektoru B plochou S .

$$\phi = \iint_S \vec{B} dS = \iint_S B_N dS \quad (\text{Wb}; \text{T}, \text{m}^2) \quad (2.11)$$

Kde B_N je průmět vektoru B do směru elementu plochy dS .

Magnetický tok lze také definovat napětím u_i indukovaným v závitu při časové změně toku Φ dle Faradayova zákona (2.2) :

$$u_i = \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{V}; \text{Wb}, \text{s}) \quad (2.12)$$

Jednotkou magnetického toku je $1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ Wb}$ (Weber). V soustavě CGSM byl jednotkou magnetického toku 1 M (Maxwell) $1 \text{ M} = 10^{-8} \text{ Wb}$.

[1], [2]

2.4 Magnetomotorická síla

Jedná se o skalární veličinu definovanou z I. Maxwellovy rovnice (2.1). Magnetomotorická síla je vyvolána proudem a působí na uzavřené dráze.

$$F_m = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint H_l \cdot dl = \sum I \quad (\text{A}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}) \quad (2.13)$$

Kde H_l je průmět vektoru \vec{H} do směru elementu dráhy $d\vec{l}$, $\sum I$ celkový proud obepínaný uzavřenou dráhou l , daný součtem proudů všech vodičů včetně uvážení jejich směrů. Je-li po celé délce dráhy l všude stejně velká intenzita pole H a má-li vektor \vec{H} všude směr elementu dráhy $d\vec{l}$, platí:

$$F_m = H \cdot l = \sum I \quad (\text{A}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}) \quad (2.14)$$

V soustavě CGSM byl jednotkou magnetomotorické síly 1 Gb (gilbert). $1\text{Gb}=0,796\text{A}$

[2]

2.5 Materiálové rovnice

Magnetické pole je definované v určitém bodě prostoru pomocí vektoru magnetické indukce \vec{B} a vektoru intenzity elektrického pole \vec{H} . Závislost mezi těmito veličinami je popsána vztahem:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (\text{T}; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.15)$$

Kde

μ_r je relativní permeabilita prostředí - bezrozměrné číslo, pro vakuum a prakticky i pro vzduch je $\mu_r = 1$
 μ_0 je permeabilita vakua (magnetická konstanta) $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$

[2], [10]

2.6 Magnetizace a magnetická polarizace

Tyto veličiny udávají změnu indukce a intenzity magnetického pole danou magnetickými vlastnostmi látek. Platí pro ně vztahy:

Magnetizace

$$\vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{T}, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.16)$$

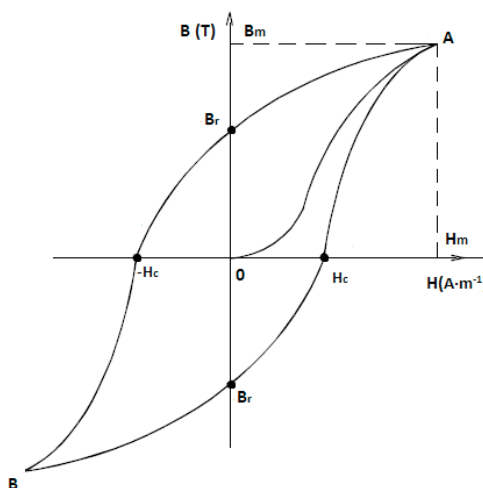
Magnetická polarizace

$$\vec{J} = \vec{B} - \mu_0 \vec{H} \quad (\text{T}; \text{T}, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.17)$$

[2]

2.7 Magnetizační křivka

U feromagnetických materiálů není relativní permeabilita μ_r konstantní, ale mění se v závislosti na velikosti magnetického pole. Hysterezní křivka (smyčka) je závislost $B = f(H)$ resp. $J = f(H)$.



Obr. 2.1 Hysterezní smyčka [10]

Vycházíme-li z předpokladu dokonalého odmagnetování materiálu ($H=0$, $B=0$) a postupně zvětšujeme H , poté se pohybujeme po tzv. křivce prvotní magnetizace (tzv. panenské křivce), na obr. 1 mezi body 0 a A. Při poklesu H v bodě A lze přejít na hysterezní smyčku. Pro tuto křivku jsou důležité zejména body:

B_r – *remanence* daná průsečíkem smyčky $B = f(H)$ s osou H . Intenzita magnetického pole klesne na nulu, v látce však zůstává remanentní magnetická indukce – látka je zmagnetovaná.

H_c – *koercitivita* daná průsečíkem smyčky $B = f(H)$ s osou B . Při této hodnotě klesne velikost magnetické indukce v látce na nulu – látka se odmagnetuje.

A a B – Jsou *body nasycení* látky tzv. *body saturace*. Tento stav nastává při intenzitě vnějšího pole H_s , pro kterou platí, že při jejím zvětšení se nezvětší polarizace J a nezmění se ani poloha bodů H_c a B_r .

[2], [8], [10],

2.8 Biot-Savartův zákon

Tento zákon udává, že magnetické pole v daném bodě je vyvoláno elementem proudového vlákna, přičemž tento element neleží v daném bodě, ale ve vzdálenosti r .

$$d\vec{H} = \frac{I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A}, \text{m}, \text{m}, \text{m}) \quad (2.18)$$

[1]

2.9 Lorenzova síla

Na pohybující se náboj v magnetickém poli působí síla, tzv. Lorenzova síla

$$dF = i \cdot [d\vec{l} \times \vec{B}] = dQ \cdot [\vec{v} \times \vec{B}] \quad (\text{N;C, m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{T}) \quad (2.19)$$

[2]

3 Řešení magnetických obvodů

Magnetický obvod je tvořen dráhou magnetického toku Φ jejíž průřez je upraven tak, aby tímto průřezem procházela většina magnetického toku. To znamená, že jen malá část toku jde mimo tento obvod, jedná se o tzv. rozptylový tok Φ_r . Magnetický obvod je tvořen feromagnetickým materiálem (viz kap. 3.1) umožňujícím soustředění magnetického toku do požadované dráhy. Zdrojem magnetického toku Φ může být buďto cívka buzená proudem, nebo permanentní magnet.

Přesné řešení magnetických obvodů je velmi obtížné, toto je způsobeno jednak malým rozdílem magnetických vodičů od nevodičů (malý rozdíl relativních permeabilit), který vede ke vzniku rozptylových toků. Dále je také k funkci některých obvodů nutná vzduchová mezera, která také vede ke vzniku rozptylových toků. Svůj nezanedbatelný vliv mají i nelineární charakteristiky a hystereze magnetických materiálů.

Kvůli těmto negativním vlastnostem se k řešení magnetických obvodů užívá jednoduchých přibližných výpočtů.

3.1 Základní vztahy pro řešení magnetických obvodů

I v magnetických obvodech můžeme nalézt analogii s ohmovým zákonem. Mezi dvěma body kde nevzniká rozptylový tok, platí:

$$U_m = R_m \cdot \Phi = \frac{\Phi}{G_m} \quad (A; H^{-1}, Wb; Wb, H) \quad (3.1)$$

Kde U_m je magnetické napětí
 R_m je reluktance (magnetický odpor)
 G_m je permeance (magnetická vodivost)
 Φ je magnetický tok

Výpočet magnetického odporu a vodivosti. Analogicky s elektrickým odporem pro reluktanci homogenního vodiče o délce l a průřezu S a relativní permeabilitě μ_r platí:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = \frac{1}{G_m} \quad (H^{-1}; m^1, H m^1, m^2; H) \quad (3.2)$$

S reluktancí a permeancí feromagnetika můžeme počítat, jen v případě, když platí vztah (2.15). V případě, kdy tento vztah neplatí a uplatňuje se hystereze materiálu (viz kap. 1.7) musíme stanovit magnetický tok z magnetovacích charakteristik pro daný druh magnetování.[2]

Obdobně jako v el. obvodech lze i v těch magnetických napsat obdoby Kirchhoffových zákonů. Pro magnetické toky jednotlivých větví stýkajících se v jednom uzlu platí:

$$\sum_{k=1}^n \phi_k = 0 \quad (Wb;) \quad (3.3)$$

Kde ϕ_k jsou toky jednotlivých větví magnetického obvodu

Pro celkový úbytek magnetického napětí na uzavřené dráze platí:

$$\sum_{k=1}^n U_{mk} = U_{mc} = \sum I = N \cdot I \quad (\text{A; A; A; -, A}) \quad (3.4)$$

Kde U_{mk} je úbytek magnetického napětí

U_{mc} je celkové magnetické napětí reluktance (magnetický odpor)

N jsou závity cívky

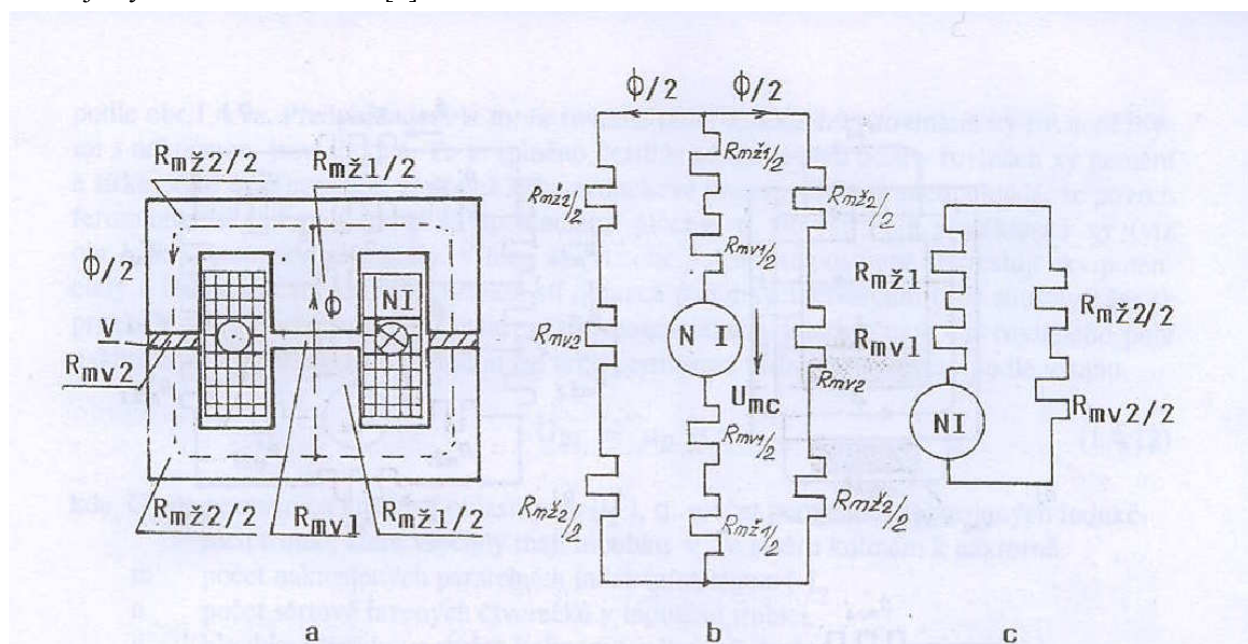
I je celkový proud obepjatý uzavřenou magnetickou dráhou

Dosadíme-li vztah (3.1) do (3.3) dostaneme Hopkinsonův zákon pro uzavřený magnetický obvod magnetovaný cívkou s N závitů a proudem I . Smysl toku Φ se řídí podle pravidla pravé ruky.

$$\sum_{k=1}^n R_{mk} \cdot \phi_k = N \cdot I \quad (\text{H}^1, \text{Wb}; -, \text{A}) \quad (3.5)$$

3.2 Náhradní schéma magnetických obvodů

Při kreslení náhradního schématu postupujeme obdobně jako u schémat elektrických. Na obrázku (3.1) Je naznačen postup při tvorbě náhradního schématu z obvodu tlumivky, při zanedbání rozptylových toků. Zanedbání těchto toků vede pouze k přibližným výsledkům. Řešení s uvažováním rozptylových toků je vysvětleno v literatuře [2].



Obr. 3.1 Postup při tvorbě náhradního schématu magnetického obvodu [2]

4 Magnetické pole země

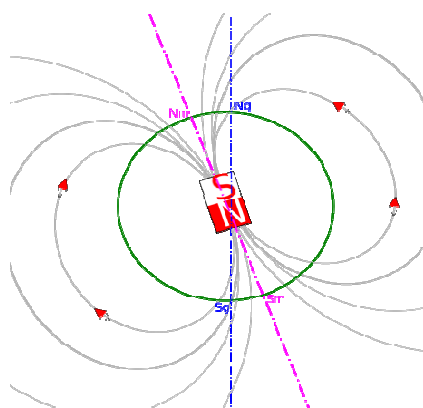
Při měření velmi slabých magnetických polí často měříme velikosti polí obdobných zemskému magnetickému poli. Proto se v této práci budu snažit krátce vystihnout základy týkající se magnetického pole země neboli geomagnetického pole.

4.1 Vznik magnetického pole země

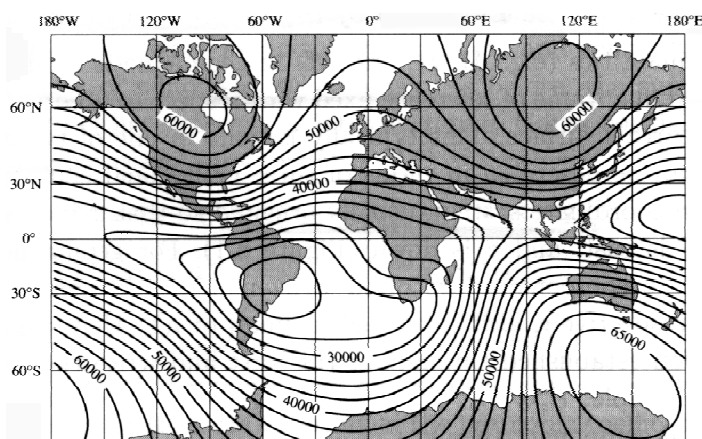
Fakt, že magnetické pole země existuje je znám již dlouhou dobu, což však doposud úplně jasné není je jeho vznik. První teorie předpokládala, že magnetické pole Země je způsobeno trvalým zmagnetováním jádra, složeného se železa a niklu. Zemské jádro je však rozžhaveno na vysokou teplotu, čímž se tato teorie dostává do rozporu s jevem při Curieově teplotě (viz kap. 5.1). Další vysvětlení by mohla poskytovat teorie geodynamo, ta tvrdí, že převážná část magnetického pole Země vzniká třením polotekutých vrstev jádra s pevnými vrstvami vnitřního jádra. Prouděním taveniny (způsobené termodynamickými jevy) obsahující ionty vzniká elektrický proud vytvářející magnetické pole.

4.2 Rozložení geomagnetického pole

Magnetické pole země lze považovat za dipólové, v principu podobné tyčovému magnetu. Ve skutečnosti je tento dipól odkloněn od zemské osy, toto odklonění činí zhruba 11° . Velikosti vektoru geomagnetického pole dosahuje asi $60\mu\text{T}$ v polárních oblastech a asi $30\mu\text{T}$ na rovníku (viz obr. 4.2). Dipólovou teorií se dá vysvětlit převážná většina pozorovaného zemského pole, zbylá část je tzv. nedipólové pole (pole vnějších zdrojů). Toto nedipólové pole je způsobeno slunečním větrem a procesy v ionosféře a magnetosféře. Amplituda tohoto pole dosahuje 2% pole vnitřního, je však značně proměnné. Vnitřní pole je také proměnné, avšak časové konstanty dosahují řádu stovek tisíců let. Z paleomagnetických výzkumů víme, že k přepólování zemského pole dochází zhruba jednou za 750000 let, tomuto přepólování předchází slábnutí magnetického pole, což se děje právě v dnešní době. [17]

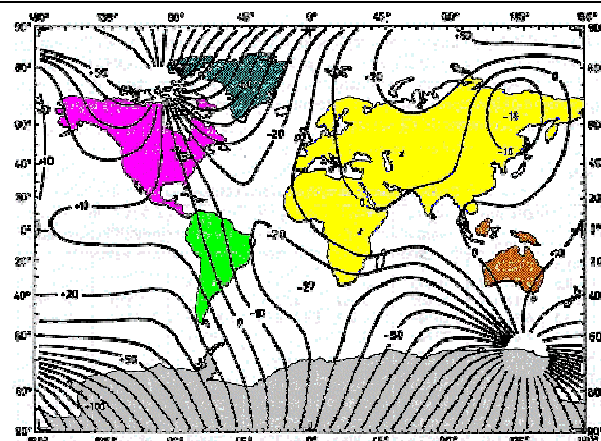


Obr. 4.1 Vnitřní magnetické pole Země [17]

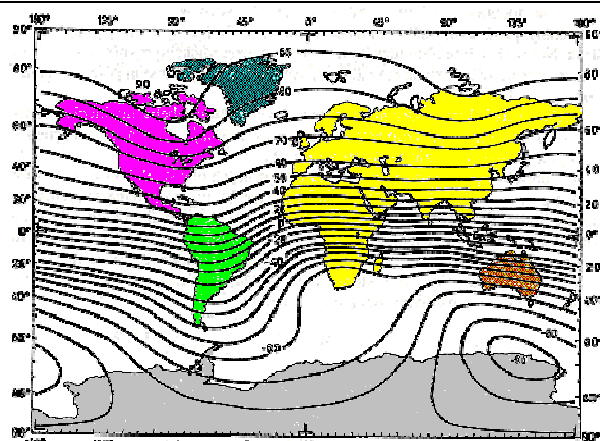


Obr. 4.2 Mapa velikosti vektoru intenzity v nT [16]

Pro popis magnetického pole Země se většinou užívá naměřených složek vektoru magnetické indukce X (severní), Y (východní) a Z (vertikální), nebo velikostí horizontální složky a dvěma úhly – úhel mezi vektorem magnetické indukce a vodorovnou rovinou se nazývá *inklinace* a úhel mezi horizontální složkou a směrem k zeměpisnému severu se nazývá *deklinace*.



Obr. 4.3 Deklinace [15]



Obr. 4.4 Inklínace [15]

5 Magnetické materiály

Pohybem všech elektricky nabitých částic vzniká v jejich bezprostředním okolí magnetické pole. Taktéž částice s elektrickým nábojem (elektrony a protony) nacházející se v samotném atomu jsou v neustálém pohybu, proto také ve svém okolí vytvářejí magnetické pole. Přírozenou vlastností látek je tudíž magnetismus (přítomnost magnetických polí). V tomto pohledu má tedy každá látka magnetické vlastnosti.

Každá elektricky nabitá částice, která periodicky obíhá po uzavřené dráze (orbitu), je ekvivalentní proudové smyčce tvaru dráhy částice a vytváří magnetický moment. Tento magnetický moment se nazývá dráhový magnetický moment. V atomu převažují elektronové dráhové momenty, což je způsobeno tím, že elektrony obíhají na drahách s většími poloměry nežli atomy. Dalším magnetickým momentem vyskytujícím se v atomu je spinový magnetický moment. Vznik tohoto momentu se spojuje s představou rotace elektronu kolem vlastní osy. Celkový magnetický moment atomu je dán vektorovým součtem magnetických momentů všech elektronů a protonů.

Z hlediska velikosti magnetického momentu dělíme látky na:

Diamagnetické – Jejichž atomy nemají magnetický moment. Vnější magnetické pole vede k precesnímu pohybu elektronových drah v atomech, čímž vzniká magnetický moment namířený proti působícímu poli, tak, že jej zeslabuje.

Paramagnetické – Jejichž atomy nebo molekuly mají magnetický moment. Působením vnějšího magnetického pole se jednotlivé domény začnou natáčet ve směru pole tak, že jej mírně zesilují. Při nulovém poli v důsledku tepelných kmitů jsou tyto látky nemagnetické.

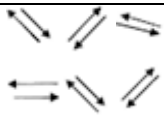
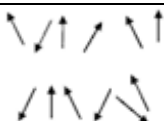
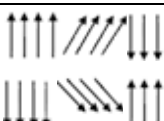
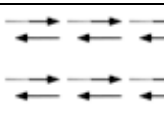
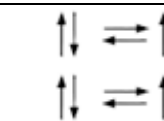
Feromagnetické – Látky, které nemají vykompenzovány spinové momenty. Skládají se také z paramagnetických atomů, ale jejich paralelní uspořádání způsobuje velké zesílení vnějšího pole.

Antiferomagnetické – Látky, u nichž za vhodných podmínek dojde k antiparalelní orientaci magnetických momentů atomů (uspořádány rovnoběžně, avšak s navzájem opačnými směry působení)

Ferimagnetické – Některé antiferomagnetické látky se skládají z několika druhů atomů, které se liší velikostí magnetického momentu. Následkem toho mají nevykompenzovaný magnetický moment.

[8], [21]

Tab. 5.1 Rozdělení magnetických materiálů [8]

Diamagnetismus	Paramagnetismus	Feromagnetismus	Ferimagnetismus	Antiferomagnetismus
Magnetický moment				
Bez vnějšího pole bez magnetického momentu. Kompenzace spinových momentů	Moment je nízký existuje bez vnějšího pole. Nepravidelné rozdělení momentových směrů.	Moment je velký, spontánní magnetizace.	Moment existuje v důsledku neúplné kompenzace	Kompenzace momentů v důsledku antiparalelního postavení
Směr momentů				
				
Relativní permeabilita				
$\mu_r < 1$	$\mu_r > 1$	$\mu_r \gg 1$	$\mu_r \gg 1$	$\mu_r \approx 1$
Příklady materiálů				
Cu, Au, Ag	Al, Sn, Pt	Fe, Co, Ni	Ferity	MnO

5.1 Feromagnetické látky

Feromagnetické látky jsou význačné tím, že v nich za teplot nižších než Curieova teplota existují oblasti zvané feromagnetické domény (Weissovy domény), ve kterých vzájemným působením atomů jsou magnetické momenty těchto atomů uspořádány paralelně, to že se atomy takto ovlivňují je způsobeno jejich vzájemnou blízkostí. Kvůli tomuto bylo do nedávné doby usuzováno, že feromagnetismus je vlastní pouze pro pevné krystalické látky, dnes však jsou známy i amorfni feromagnetika.

Zahříváním feromagnetických látek dochází ke vzdalování jejich atomů, počet atomů s paralelní orientací magnetických momentů se postupně zmenšuje, až dosažením Curieovy teploty zanikají domény a tím i feromagnetický stav látky.

Přestože ve feromagnetikách existují domény, v nichž je látka zmagnetována, těleso z feromagnetika se navenek projevuje jako nezmagnetované. Domény jsou totiž uspořádány tak, aby celková energie soustavy byla co nejmenší.

V elektrotechnické praxi se zavedlo dělení feromagnetických látek na magneticky měkké a magneticky tvrdé. [2],[8]

5.1.1 Magneticky měkké materiály

Vyznačují se strmou křivkou prvotní magnetizace a úzkou hysterezní smyčkou. Tyto materiály lze snadno přemagnetovat, proto se nejčastěji používají ve střídavých magnetických polích (indukční motory, transformátory)

Základní vlastnosti:

- snadno se zmagnetují
- malá koerktivní intenzita H_c
- velká počáteční a maximální permeabilita
- malé hysterezní ztráty při magnetování střídavým proudem
- snadnost nasycení

Klasifikace materiálů

- Technicky čisté Fe (železo Armco)
- Nízkouhlíkaté oceli
- Křemíkové oceli
- Slitiny Ni – Fe
- Slitiny Fe – Co
- Amorfni kovové slitiny

Material	Composition	μ_{\max}	H_c , A/m	B_s , T
Cobalt	Co _{99,8}	250	800	1.79
Permendur	Fe ₅₀ Co ₅₀	5,000	160	2.45
Iron	Fe _{99,8}	5,000	80	2.15
Nickel	Ni _{99,8}	600	60	0.61
Silicon-Iron ^a	Fe ₉₆ Si ₄	7,000	40	1.97
Hiperco	Fe ₆₄ Co ₃₅ Cr _{0,5}	10,000	80	2.42
Supermendur	Fe ₄₉ Co ₄₉ V ₂	60,000	16	2.40
Ferroxcube 3F3 ^b	Mn-Zn-Ferrite	1,800	15	0.50
Manifer 230 ^c	Ni-Zn-Ferrite	150	8	0.35
Ferroxplana ^d	Fe ₁₂ Ba ₂ Mg ₂ O ₂₂	7	6	0.15
Hipernik	Fe ₅₀ Ni ₅₀	70,000	4	1.60
78 Permalloy	Fe ₂₂ Ni ₇₈	100,000	4	1.08
Sendust	Fe ₈₅ Si ₁₀ Al ₅	120,000	4	1.00
Amorphous ^e	Fe ₈₀ Si ₂₀	300,000	3.2	1.52
Mumetal 3	Fe ₁₇ Ni ₇₆ Cu ₅ Cr ₂	100,000	0.8	0.90
Amorphous ^e	Fe _{4,7} Co _{70,3} Si ₁₅ B ₁₀	700,000	0.48	0.71
Amorphous ^e	Fe ₆₂ Ni ₁₆ Si ₈ B ₁₄	2,000,000	0.48	0.55
Nanocrystalline	Fe _{73,5} Si _{13,5} B ₉ Nb ₃ Cu	100,000	0.40	1.30
Supermalloy	Fe ₁₆ Ni ₇₉ Mo ₅	1,000,000	0.16	0.79

^aNonoriented; ^bat 100 kHz; ^cat 100 MHz; ^dat 1000 MHz; ^eannealed.

Obr. 5.1 Magnetické vlastnosti některých magneticky měkkých materiálů [4]

5.1.2 Magneticky tvrdé materiály

Tyto materiály mají širokou hysterezní smyčku, obtížně se magnetují a odmagnetují. Používají se především v aplikacích se stacionárním magnetickým polem, především k výrobě permanentních magnetů.

Základní vlastnosti

- Nesnadno se zmagnetují a velmi obtížně se přemagnetovávají
- Velká koerktivní intenzita H_c
- Velká remanentní indukce B_r
- Velké hysterezní ztráty při magnetování střídavým proudem

Klasifikace materiálů

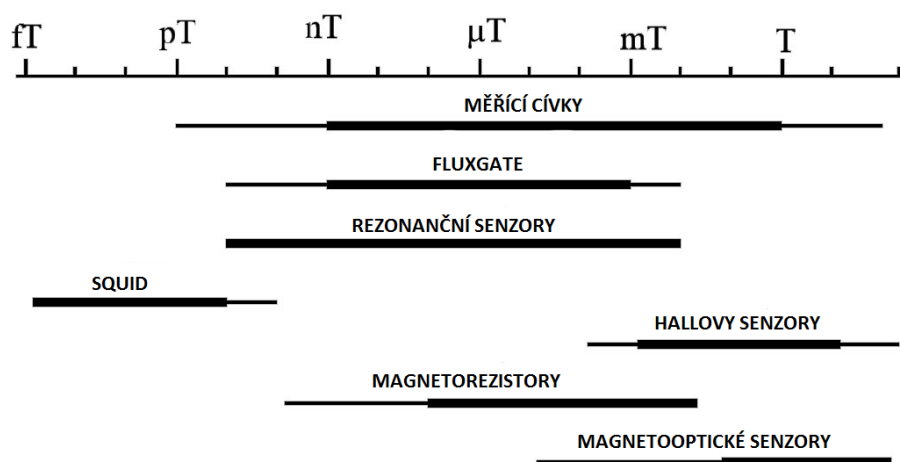
- Kalené oceli s martenzitickou strukturou
- Legované oceli (W, Cr, Co, Mo)
- Slitiny Alnico (Fe-Al-Ni-Co)
- Slitiny Cunife, Cunico, Vicalloy
- Ostatní slitiny [8]

6 Magnetické senzory a přístroje

Při měření magnetických polí je problém samotný rozsah magnetických polí, který skýtá několik řádů, s tímto rozsahem se pojí i volba samotného měřicího prvku (přístroje). Následující tabulka a obrázek přibližně popisují rozsah magnetických polí (tab. 6.1) a rozsah jednotlivých měřících metod (obr. 6.1) - tenkou čarou jsou znázorněny špičkové a laboratorní přístroje.

Tab. 6.1 Rozsah magnetických polí [11] - upraveno

Hodnota B (T)	Výskyt
100 T	Pulzní pole
10 T	Supravodivý elektromagnet
2 T	Elektromagnet
0.5 T	Povrch silného permanentního magnetu
10 mT	Pole silového vodiče
50 μ T	Zemské pole
1 μ T	Automobil
10 fT	Lidský mozek



Obr. 6.1 Rozsahy jednotlivých měřících metod [11] - upraveno

Volba samotného typu měřicího přístroje z hlediska velikosti měřeného pole však není jediné kritérium, dále je třeba brát na zřetel rychlost změn měřeného pole a také zda se požaduje určení jeho směru. Dále nesmíme zanedbat to, že vlastní parametry měřící sondy mohou ovlivnit měřené magnetické pole, například velikost měřících sond – rozměrově velké sondy snímají magnetické pole ve velké oblasti a jejich údaj proto nemusí být přesný. Dále by pak u určitých typů sond měla být dodržena vzdálenost od feromagnetických materiálů, jejichž přítomnost může ovlivnit přesnost měřící sondy.

Stěžejními problémy přístrojů pro měření magnetických polí je neurčitost nuly, její chod s časem a teplotní a napěťový drift. Dalšími důležitými parametry senzorů jsou: cena, spolehlivost, odolnost proti vnějším vlivům (teplota, vlhkost, vibrace atd.). Většina senzorů a magnetometrů (magnetometr = senzor + zpracování signálu) měří velikost pole v daném směru, proto je nutné pro změření vektoru použít 3 ortogonálních čidel nebo případně použít náhradní početní metodu s pomocí známého pole (malá přesnost). Dnes však existují i senzory měřící ve všech 3 směrech. [2], [21]

Podle principu funkce dělíme senzory na :

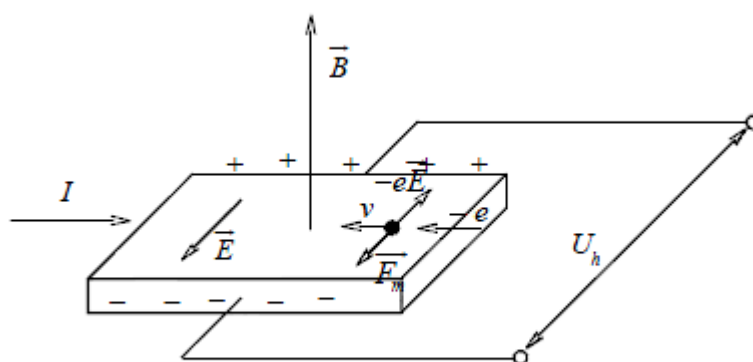
- **magneto – galvanické** – polovodičové magnetorezistory, Hallové sondy
- **magneto – rezistivní** – Anizotropní magnetorezistory, GMR
- **indukční** – Indukční cívky, Fluxgate
- **magneto – optické** – magnetostrikční, magnetooptická
- **Rezonanční** – Protonový, Césiový magnetometr
- **Ostatní** – SQUID, GMI

[6]

Dále budou zmíněny pouze senzory v praxi nejčastěji využívané

6.1 Hallové senzory

Tyto senzory používají principu Lorentzovy síly a Hallova jevu. Hallův jev vzniká, vložíme-li tenkou vodivou destičku z vodiče nebo polovodiče protékanou proudem I do magnetického pole o indukci B . Na náboj působí dle vztahu (2.19) síla. Tato síla zakříví dráhy nábojů tak, že na protilehlých bočních stěnách destičky se objeví náboje různého znaménka a uvnitř destičky vznikne příčné elektrické pole E (obr. 6.2). Odchylování nositelů náboje bude pokračovat tak dlouho, dokud vzniklé elektrické pole E nevyrovná působení magnetického pole. Potom síla F , kterou působí na náboj elektrického pole, bude rovna Lorentzově síle a nastane ustálený stav, neboť výsledná síla, působící na náboj napříč destičkou, bude rovna nule. Za předpokladu, že magnetické pole je kolmé ke směru proudu (vektory v a B jsou na sebe kolmé), bude platit [8], [3]:



Obr. 6.2 Hallův jev [10]

$$q_e E = q_e v B. \quad (\text{C}, \text{V} \cdot \text{m}^{-1}; \text{C}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{T}) \quad (6.1)$$

Pro tzv. Hallovo napětí U_H , měřené mezi spodní a horní hranou destičky platí:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d} \quad (\text{V}; \Omega \cdot \text{m} \cdot \text{T}^{-1}, \text{A}, \text{T}, \text{m}) \quad (6.2)$$

Kde R_H je Hallova konstanta
 I je pomocný proud destičkou
 B je magnetická indukce
 d je tloušťka destičky

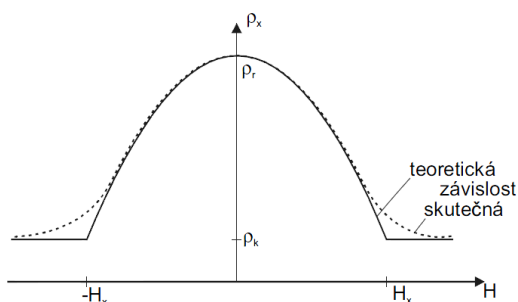
[3]

Většina vyráběných magnetických senzorů (více než 90%) tvoří Hallovy sondy. Použití Hallovy sondy je vhodné pro magnetické indukce vyšší než $10 \mu\text{T}$, jsou schopny měřit v širokém rozsahu teplot a při frekvencích od 0 do 30 kHz. Integrované Hallovy sondy jsou robustní, odolávají znečištění prostředí a jsou levné. Další výhodou je absence feromagnetika v samotné sondě proto s nimi lze měřit v těsné blízkosti feromagnetik. Hlavní nevýhodami jsou teplotní závislost citlivosti, nestálost offsetu a jeho teplotní drift a šum. [2]

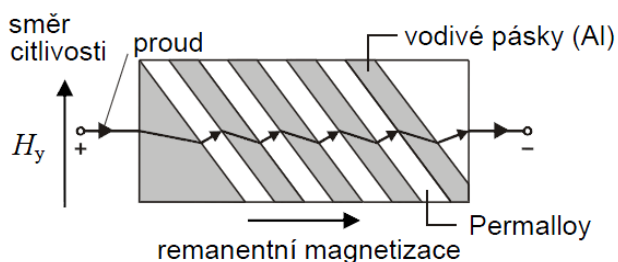
Kromě křemíku se při výrobě Hallovy senzorů používá i InSb, InAs, GaAs a další polovodiče. Tenkovrstvé InSb Hallovy senzory mají tu výhodu, že mají díky vyšší elektronové mobilitě použitého materiálu asi pětikrát větší citlivost ve srovnání se senzory založenými na křemíku. Hlavní výhodou senzorů z InAs je jejich nízká teplotní závislost, pracovní rozsah převyšuje interval -40 až $+150^\circ\text{C}$. U GaAs senzorů založených na vícevrstvých heterostrukturách se dosahuje hodnot nejnižšího šumu. [4]

6.2 Anizotropní magnetorezistory

Obecně využívají magnetorezistivní senzory princip magnetorezistivního jevu ve feromagnetických materiálech. Senzory AMR jsou založeny na tzv. anizotropním magnetorezistivním jevu, jenž se zejména silně projevuje v tenkých feromagnetických vrstvách (v praxi se používá permalloy (Py), slitina NiFe s obsahem niklu kolem 80 %). Tenký proužek Py vykazuje výraznou magnetickou anizotropii se snadnou osou v podélném směru. V tomto směru také protéká proužkem elektrický proud. Elektrický odpor významně závisí na úhlu mezi protékajícím proudem a magnetizací proužku. Dojde-li tedy v důsledku působení vnějšího pole k vychýlení magnetizace ze směru podélné osy proužku, změní se jeho odpor. Největší odpor vykazuje materiál pro rovnoběžnou orientaci proudu a magnetizace, nejnižší naopak pro úhel 90° mezi proudem a magnetizací. Poměr rozdílu maximální a minimální rezistivity nabývá při pokojové teplotě hodnot několika procent.[4]



Obr. 6.3 Závislost resistivity AMR [14]



Obr. 6.4 Princip AMR s užitím "Barber Poles" [3]

Nevýhodou těchto senzorů je unipolární a značně nelineární charakteristika (obr.6.3), navíc v základním uspořádání nejsou schopny rozlišit směr měřeného magnetického pole. Tyto problémy se řeší použitím tzv. "Barber Poles" kdy jsou na permalloy nanášeny proužky hliníku pod úhlem 45° (obr. 6.4), tímto se pracovní bod posune doprostřed mezi vrchol charakteristiky a zlom saturační oblasti. Další nevýhoda nastává při působení silných polí, které mohou způsobit překlápění směru vnitřní magnetizace (charakteristiky). Tomuto se předchází periodickým magnetováním materiálu v obou směrech (tzv. flipping). V průmyslově vyráběných senzorech bývá zvykem zapojit dva páry komplementárních Py

proužků do plného Wheatstoneova můstku. Měřené diagonální napětí je úměrné působícímu poli dle vztahu [14], [2]:

$$U_{BD} = I_{AC} \cdot \Delta R \cdot \frac{H}{M} \quad (V; A, \Omega, A \cdot m^{-1}, A \cdot m^{-1}) \quad (6.3)$$

Kde I_{AC} je napájecí proud můstku
 ΔR je rozdíl maximálního a minimálního odporu AMR
 H je působící magnetické pole
 M je magnetizace

Magnetorezistivní senzory se používají v řadě průmyslových aplikací, na trhu jsou dostupné senzory integrované v zapojení do Wheatstoneova můstku s flipovací cívkou. Tento typ senzorů je schopen rozlišitelnosti až 10nT. Nevýhodou je vysoká teplotní závislost offsetu. [4], [14]

6.3 Indukční senzory

Tyto sondy pracují na základě Faradayova indukčního zákona vztah (2.12) doplníme li tento vztah o vztahy (2.11) a (2.15) dostáváme pro cívku s N závitů která svírá s vektorem H úhel α vztah:

$$U_i = -N \cdot \frac{d(\mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \cdot S \cdot \cos \alpha)}{dt} \quad (V; -, -, H \cdot m^{-1}, A \cdot m^{-1}, m^2, -) \quad (6.4)$$

Ze vztahu (6.4) vyplývají principy funkce indukčních senzorů:

- proměnná relativní permeabilita – fluxgate senzory
- proměnný úhel α – rotační magnetometry
- Proměnná intenzita pole – měřicí cívky

[2]

6.3.1 Měřicí cívka

Nejjednodušší prvek pro měření magnetického pole (převodník magnetického toku na napětí). Tyto senzory jsou vhodné jen pro měření střídavých magnetických polí bez statické složky. Výhodou těchto senzorů je stabilita, linearita a také jednoduchost.

Pro periodické průběhy dostaneme odvozením ze vztahů (2.11) a (2.12) :

$$B_m = \frac{U_s}{4 \cdot f \cdot S_c \cdot N} \quad (T; V, Hz, m^2, -) \quad (6.5)$$

Kde B_m je Maximální hodnota indukce
 U_s je Střední hodnota indukovaného napětí
 S_c je plocha průřezu cívky

Ze vztahu (6.5) vyplývá, že citlivost cívky roste s kmitočtem, s tímto však nastává problém při kmitočtech blízkých rezonančnímu kmitočtu, kdy rezonance nastává mezi indukčností cívky a parazitními mezizávitovými kapacitami a způsobuje značnou nelinearitu indukovaného napětí. Pro zvýšení maximální

frekvence se používá tzv. proudový režim (viz literatura [2]). Citlivost také závisí na ploše průřezu a počtu závitů cívky, zde se setkáváme s konstrukčními omezeními (velikost, odpor vinutí). Vzduchové cívky jsou vhodnější pro měření polí o vysokých frekvencích, kdy je velikost indukovaného napětí vyšší. Pro zvýšení citlivosti se používají cívky s feromagnetickým jádrem toto však sebou nese nebezpečí nelinearity a zhoršení teplotní i frekvenční závislosti parametrů měřicí cívky. [2]

Frekvenční rozsah indukčních cívek je od 100μHz až po stovky kHz při precizním mechanickém provedení dosahují citlivostí až mV/ nT. [4]

6.3.2 Rotační cívka

Nespornou výhodou rotačních cívek je schopnost měřit stejnosměrná pole. Pro indukované napětí rotační cívky platí vztah:

$$U_i = -N \cdot S \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \cdot \omega \sin \omega t \quad (V; -, m^2, -, H \cdot m^{-1}, A \cdot m^{-1}, s^{-1}, s^{-1}, s) \quad (25)$$

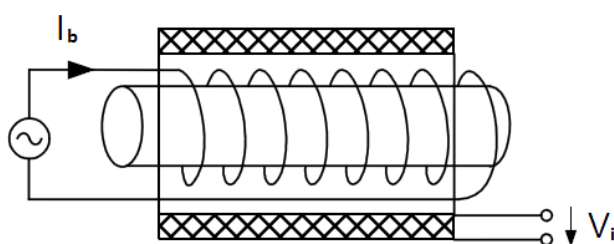
Tyto senzory dokážou měřit až s rozlišením 1 nT na rozsazích 50nT – 20mT, nevýhodou je jejich vysoká cena a složitost konstrukce.

[2], [4]

6.3.3 Feromagnetická cívka fluxgate

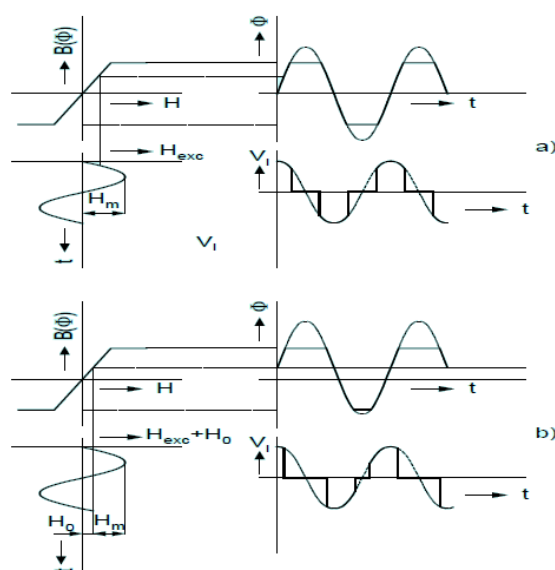
Tyto snímače pracují podle vztahu :

$$u_2(t) = N_2 \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \frac{d\mu_r}{dt} \cdot H \quad (V; -, m^2, H \cdot m^{-1}, -, s, A \cdot m^{-1}) \quad (6.6)$$



Obr. 6.5 Základní schéma fluxgate sondy [3]

Podle vztahu (6.6) je principem funkce změna magnetického toku v závislosti na relativní permeabilitě – střídavý proud prochází přes budící cívku a vytváří střídavé magnetické pole, které způsobuje střídavou saturaci jádra. Bez přítomnosti vnějšího magnetického pole je jádro symetricky přesycováno do obou polarit, tudíž i tok je sinusový, ale je omezen saturací jádra, indukované napětí ve snímacím vinutí je dle vztahu (2.12) derivací magnetického toku a průběh indukovaného napětí se skládá pouze z lichých harmonických. Při působení vnějšího pole dojde k nesymetrizaci sycení jádra, což se projeví i na průběhu indukovaného napětí ve snímacím vinutí tím způsobem, že v něm dojde k výskytu sudých harmonických. Viz obrázek 6.6.



Obr. 6.6 Princip fluxgate sondy a) Bez vlivu vnějšího pole b) působením vnějšího pole [9]

Nevýhodou základního zapojení fluxgate senzoru (obr. 6.5) je výskyt rušivého signálu z výstupu sondy na základní harmonickou buzení, k odstranění tohoto jevu se používají senzory s dvěma jádry v anglické literatuře známé jako Double-Rod sensors (variace je typ Foersterovy sondy), senzory s prstencovým jádrem (Ring-Core sensors). Další nevýhodou je špatná energetická bilance při sinusovém napájení, když se v okamžiku přesycení impedance cívky redukuje pouze na její odpor, budícím vinutím začnou protékat velké proudy. Tento problém se řeší použitím sériového rezonačního kondenzátoru. [2], [4], [3]

„Senzory fluxgate se stále dají považovat za nejpřesnější vektorové magnetické senzory pracující při pokojových teplotách. Jsou schopny dosahovat rozlišení až 100 pT při rozsahu 100 pT až 100 μ T, jejich nelinearita dosahuje jednotek procent. Nevýhodou je teplotní závislost offsetu. Nevýhodou byla i jejich obtížná miniaturizace, dnes se však senzory vyrábějí nejen klasicky vinutím, ale i technologií tištěných spojů a CMOS [4]

6.4 Rezonanční senzory

V praxi se nejčastěji využívají rezonanční magnetometry opticky buzené (např. Césiové) pracující na Zeemanově jevu, kdy působením stejnosměrného magnetického pole dochází ke štěpení spektrálních čar, rozdíl energií nově vzniklých spektrálních čar je úměrný velikosti magnetického pole.

Dalším rozšířeným rezonančním senzorem je Protonový magnetometr pracující na Precesním pohybu protonů v Benzenovém jádře po působení vnějšího magnetického pole. Precesní frekvence je úměrná měřenému magnetickému poli. Dosahované rozlišení je typicky 0,1 nT, rychlost 1 měření za sec., omezený rozsah (např. 20 000 až 100 000 nT). Absolutní přesnost bývá 1 nT.

Nevýhodou těchto přístrojů je, že jsou z principu skalárního typu, výstup tudíž závisí pouze na velikosti měřeného pole. [2], [11]

7 Magnetické stínění

Magnetické stínění je pro techniku nezbytné, neboť na rozdíl od elektrického pole magnetické pole nemůže být zblokováno nebo izolováno. Toto vysvětluje jedna z Maxwellových rovnic (2.4) která říká, že neexistují magnetické monopóly (tzn. nelze odělit severní pól magnetu od jižního). Při měření velmi slabých magnetických polí je stínění také důležité, neboť samotné měření mohou ovlivnit rušivá pole vyvolané například geomagnetickým polem, které nabývá hodnot kolem $50\mu\text{T}$ (viz kap. 4) s variacemi až 500nT , nebo magnetickým ruchem způsobeným aktivitou člověka, který se může pohybovat od 10 nT v magneticky klidných oblastech až po 1 mT v průmyslových provozech. Princip magnetického stínění má spojitost s chováním magnetického pole na rozhraní dvou látek. [9], [4]

7.1 Magnetické pole na rozhraní dvou látek

Typickým příkladem je pole na rozhraní dvou látek o různých permeabilitách. (obr. 7.1). Pole v prvním prostředí nechť má indukci B_1 , která má vůči kolmici k na rozhraní sklon α_1 . Ve druhém prostředí se změní indukce na B_2 . Vztah mezi vektory B_1 , B_2 nalezneme aplikací vztahu (2.4) na elementární valeček o výšce dh a ploše podstavy ΔS , který bude protínat rozhraní. Protože indukční tok pláštěm valečku je vzhledem k $dh \rightarrow 0$ zanedbatelný, uplatní se jen tok podstavami ΔS . Tedy platí

$$B_1 \cos \alpha_1 = B_2 \cos \alpha_2 \quad \text{resp.} \quad B_{1n} = B_{2n} \quad (7.1)$$

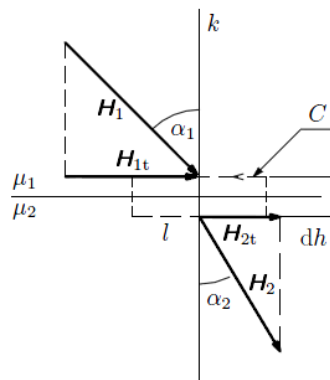
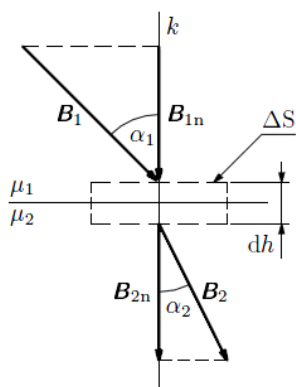
Normálové složky indukce se na rozhraních zachovávají.

Aplikací vztahu (2.1) na elementární obdelníček C (obr. 7.2), protínající rozhraní uprostřed $dh \rightarrow 0$ jeho strany délky l jsou rovnoběžné s rozhraním. Protože obdelníček C neuzavírá žádný proud (předpokládáme, že rozhraním proud neteče) a $dh \rightarrow 0$, musí platit

$$H_1 \sin \alpha_1 = H_2 \sin \alpha_2 \quad \text{resp.} \quad H_{1t} = H_{2t} \quad (7.2)$$

Pro normálové složky intenzity platí s použitím vztahu (22) doplněným o (11) pak platí:

$$\mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n} \quad (7.3)$$



Obr. 7.1 lom vektoru B na rozhraní dvou látek [12] Obr. 7.2 lom vektoru H na rozhraní dvou látek [12]

Vydělíme-li rovnici (7.2) rovnicí (7.1) získáme

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (7.4)$$

Na rozhraní dvou látek bez povrchových proudů, se indukční čáry a siločáry magnetického pole lámou tak, že úhly α_1 a α_2 splňují vztah (7.4).

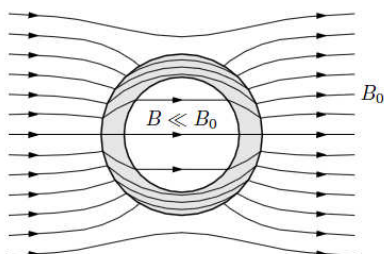
Závěry pro případ, že jednou látkou je feromagnetikum:

- a) Feromagnetikem je látka 2 (pole vstupuje např. ze vzduchu do železa), pak $\alpha_1 \ll \alpha_2$ (čili při vstupu do železa se indukční čáry přiklání k jeho povrchu). Indukční čáry se lámou od kolmice.
- b) Feromagnetikum je naopak látka 1, pak $\alpha_2 \ll \alpha_1$; indukční čáry se lámou ke kolmici
- c) Je-li $\alpha_1 = 0$, je i $\alpha_2 = 0$ (platí pro všechny látky).

[12]

7.2 Konstrukce magnetického stínění

Základním principem magnetického stínění je podle poznatků uvedených výše vytvoření nejlépe uzavřené vrstvy z feromagnetického materiálu (obr. 7.3) s co nejvyšší relativní permeabilitou. Tak, že siločáry okolního magnetického pole se průchodem materiálu lámou ke kolmici a zhušťují se, stíněnému prostoru se „vyhýbají“. Ve stíněném prostoru je magnetické pole velmi slabé. Také je to možné vysvětlit tím, že magnetický odpor stínění je velmi malý a indukční čáry jdou „cestou nejmenšího odporu“. [7]



Obr. 7.3 Princip magnetického stínění [12]

Stínění pomocí feromagnetických krytů není jedinou možností, stínění může být realizováno pomocí skupiny cívek a měřícího členu, kdy je vnější pole měřeno a cívkami je kompenzováno. Další možnost je využití supravodivého stínění založeném na Meissnerově jevu. Tyto typy stínění jsou však nákladné a jejich použití je omezené. [4]

Jako vyjádření míry kvality stínění se zavádí tzv. stínicí faktor definován jako podíl velikosti vnějšího pole ku poli vnitřnímu :

$$S_T = \frac{B_o}{B_i} \quad (-; T, T) \quad (7.5)$$

O kvalitě stínění nevypovídá pouze stínicí faktor, ale také homogenita odstíněného pole. Z konstrukčního hlediska závisí kvalita stínění na:

- Orientací stínění vůči vnějšímu poli
- permeabilitě stínícího materiálu
- tvaru a velikosti stínění
- tloušťce stěny stínícího materiálu
- nehomogenitách ve stínícím obvodu
- vzduchových mezerách mezi jednotlivými vrstvami stínění
- zhotovení ohybů a spojů
- žíhání a demagnetizaci

[4]

7.2.1 Orientace stínění vůči vnějšímu poli

Stínící kryt musí být vhodně orientován vůči vnějšímu poli. Existují dva mezní případy kdy siločáry magnetického pole vstupují kolmo ke stínění a když je stínění umístěno k siločárám paralelně. Vliv stínícího obvodu v těchto případech popisuje obrázek (7.3)



Obr. 7.3 Vliv orientace stínícího obvodu [13]

V první části obrázku procházejí siločáry kolmo stínícím obvodem beze změny. Tohoto jevu se dá s výhodou využít. Umístíme-li vhodně stínění tak aby magnetické čáry zemského pole vstupovaly kolmo ke stínícímu obvodu, zamezíme tím nežádoucího sycení materiálu tímto polem. [13]

7.2.2 Vliv permeability materiálu

Vliv permeability stínícího materiálu je zřejmý, nejvhodnější jsou materiály s velmi vysokou permeabilitou μ_r řádově 10^5 (např. Permalloy, Mumetal, amorfni materiály) viz obr. (5.1). Při volbě materiálu je nutné zohlednit i vliv frekvence vnějšího pole na jeho permeabilitu. Kdy k dramatickému propadu permeability dochází při frekvencích nad 1kHz. Pro stínění střídavých polí se dá s výhodou využít vlivu indukce vířivých proudů ve vodivých materiálech. Tyto proudy se indukují ve vodiči a podle Lenzova pravidla působí jejich magnetické pole na pole, které je vyvolalo tak, že jej zeslabují. [13]

7.2.3 Vliv tvaru stínění, vícevrstvé stínění

Závislost stínícího faktoru na tvaru stínění je různá pro každý tvar stínícího obvodu, taktéž není v celém objemu stínění stejná, v praxi se nejčastěji využívají kulové nebo válcové stínící obvody a to kvůli homogenitě odstíněného pole, pro jejich střední stínící faktor bylo empiricky zjištěno:

$$S_T = 1 + G \frac{\mu_r \cdot t_s}{D} \quad (-; -, -, m, m) \quad (7.6)$$

Kde t_s je tloušťka stěny stínění

D je průměr stínění

μ_r je relativní permeabilita stínícího materiálu

G je konstanta tvaru stínění (pro kouli 4/3, pro válec 1)

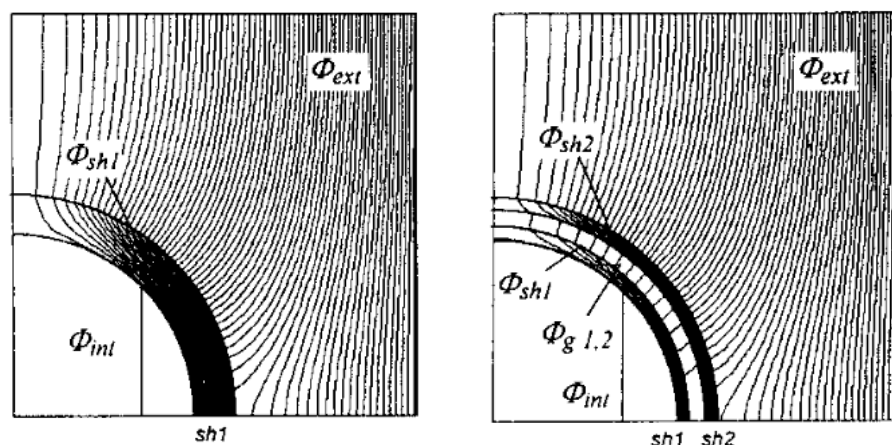
Technicky je velmi obtížné vyrobit stínění kulové a v některých případech nemusí být vhodné ani stínění válcové. Pro stínící faktor krychle platí vztah (7.6) kde $G=4/5$ a D je rovno straně krychle.

Vliv tloušťky stěny stínění na stínící faktor je zřejmý, a popisuje jej vztah (7.6) avšak je třeba vhodně volit tuto tloušťku, aby nedocházelo k saturaci materiálu vnějším polem a tím k razantnímu poklesu permeability. Což však je zřejmé méně, je vliv vícevrstvého stínění, použitím vícevrstvého stínění se dá dosáhnout lepšího stínícího faktoru a větší úspory materiálu nežli u stínění jednoduchého. Pro stínící faktor dvouvrstvého kulového stínění (obr. 7.4) platí:

$$S_{TD} = S_1 \cdot S_2 \cdot \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \right] + S_1 + S_2 + 1 \quad (7.7)$$

Kde $S_1, S_2 = G \frac{\mu_r \cdot t_s}{D}$ je stínící faktor každé vrstvy stínění
 D_1, D_2 jsou průměry vrstev stínění

V krajním případě, kdy průměry $D_1 \rightarrow D_2$ kdy stínící vrstvy leží prakticky na sobě, se efekt dvou stínění mění na součet.



Obr. 7.4 Vliv stínění na okolní magnetické pole a) jednoduché stínění b) dvojitě [4]

U vícevrstvého stínění bylo zjištěno, že nejlepších parametrů stínění se dosahuje, když průměry stínících vrstev rostou lineárně a to tak, že průměr každé další vrstvy stínění bude n krát větší nežli průměr předchozí vrstvy, přičemž n je 1,3 pro kulové stínění a 1,5 pro válcové.

Na materiál umístěný mezi jednotlivými vrstvami nejsou kladeny zvláštní nároky, použitelné materiály jsou např. vzduch, dřevo, papír, plast, kovy atd.

[4], [7], [13]

7.2.4 Zhotovení ohybů a spojů, nehomogenity ve stínícím obvodu

Při použití stínícího materiálu z více částí, musí být vhodně ošetřeny jejich spojení, v opačném případě vzniklé vzduchové mezery negativně ovlivní kvalitu stínění. Vhodné je spoje překládat a zajistit jejich pevný kovový styk, nebo použít speciální magneticky vodivou lepicí pásku. K mechanickému upevnění krytu se dají použít lepidla, šrouby, nýty, svary. Je však třeba dbát na to, že magnetické vlastnosti většiny stínících materiálů jsou silně závislé na mechanickém namáhání. [13]

Technicky není možné zajistit homogenní stínící obvod (přístupové otvory, průchodky pro kabely atd.) Tyto přístupové otvory samozřejmě zhoršují stínící faktor, také zhoršují homogenitu stíněného pole vztahy pro výpočet je možné nalézt v literatuře [4].

7.2.5 Žihání, demagnetizace

Stínicí obvody s velmi vysokým stínícím faktorem, se často konstruují válcového tvaru, stínění je realizováno šesti vrstvami 1mm tlustého plechu (Permalloy). Takto zhotovené stínění je nutné jednou vyžít a následně demagnetizovat. Žihání uvolní mechanické napětí způsobené mechanickým zpracováním, dosáhne se jím také optimální permeability materiálu. Standardní žihací cyklus pro krystalický Permalloy zahrnuje několikahodinové žihání v suchém vodíku při teplotách kolem 1100°C a následné pomalé chladnutí. Po vyžhání je nutné se stíněním zacházet opatrně, i malé mechanické namáhání může vážně snížit permeabilitu. V tomto ohledu se lépe jeví moderní amorfní materiály, které jsou mnohem méně náchylné k mechanickému namáhání, použitím těchto materiálů je možné se žihání vyhnout.

Hodnota magnetického pole uvnitř stínění je velmi závislá na magnetické historii materiálu. Po vyžhání je vhodné materiál stínění demagnetizovat. Toto zbavení magnetizace může být dvojího druhu, buďto termální (viz kap. 5.1), nebo obvykle jednodušší, magnetické. K odmagnetování se užívá obvykle střídavé magnetické pole síťové frekvence zeslabovaného od hodnoty nasycení k nule. U rozměrných vzorků s velkou permeabilitou je vhodnější užít magnetického pole nižší frekvence nebo pomalu komutovaného stejnosměrného pole, protože magnetický povrchový jev (viz literatura [2]) brání proniknutí toku do vnitřní části materiálu.

Takto zhotovené stínění dosahuje hodnot vnitřního pole jednotek nanotesla, toto pole je způsobeno spíše remanencí materiálu nežli vnějším polem. Výrobci takovýchto stínících krytů jsou například firmy Shoensted, Mushield, Vacuumschmelze atd. [4]

8 Měření rozložení magnetického pole v okolí feromagnetické soustavy

Tato kapitola se zabývá měřením magnetického pole v okolí komory elektronového mikroskopu. Pole je nutné zmapovat, neboť u takto přesných aplikací i malé magnetické pole může způsobit velké problémy, tyto jsou dány silovým působením magnetického pole na elektronový svazek mikroskopu (viz kap. 1.9). Pro toto měření byl zvolen měřicí přístroj F. W. Bell 5180 vhodný pro měření v blízkosti feromagnetických materiálů. Pro uchycení měřicí sondy tohoto přístroje byl zkonstruován měřicí přípravek. Samotné měření je rozděleno do tří bodů. V prvním bodě byla změřena indukce magnetického pole v okolí samotného přípravku. Ve druhém bodě měření indukce probíhalo v blízkosti stínící komory vyrobené z jednoho kusu materiálu. V poslední části měření byla pro porovnání v několika bodech změřena magnetická indukce komory svařované z více částí.

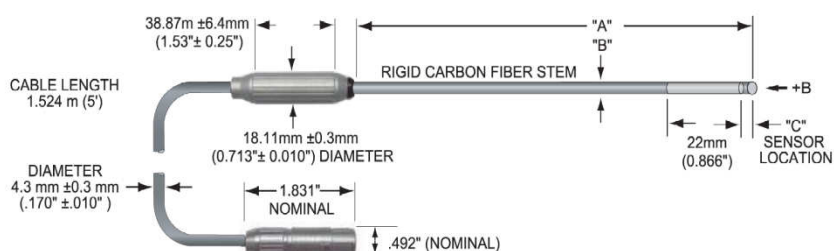
Cílem měření je zmapovat rozložení magnetického pole uvnitř a částečně vně stínící komory, zjistit jak komora ovlivňuje vnější pole a zhodnotit kvalitu jejího stínění. Porovnat rozložení magnetického pole u komory vyrobené z jednoho kusu a u komory svařované z více částí.
[20]

8.1 Měřicí přístroj

Laboratoř magnetických měření disponuje měřicím přístrojem firmy F. W. Bell - model 5180 – jedná se o přenosný ruční přístroj schopný měřit jak střídavá, tak stejnosměrná magnetická pole, přístroj měří TRMS hodnotu AC signálu. Přístroj je navíc vybaven analogovým výstupem pro zobrazení dat na osciloskopu. Je vhodný pro provozní měření, avšak dostatečně přesný i pro měření laboratorní. Přístroj pracuje se sondami na principu Hallova jevu, proto je vhodný i pro měření v blízkosti feromagnetických materiálů. Pro měření byla použita sonda MOS51-3204 vhodná pro měření slabých magnetických polí. Parametry přístroje a sondy viz tabulky 3 a 4.



Obr.16 Měřicí přístroj F.W.Bell 5180[15]



Obr.17 Low field sonda MOS51-3204[16]

Tab.3 Parametry měřicího přístroje F.W.Bell 5180[15]

Přesnost na DC rozsahu	1,1%
Frekvenční rozsah	DC – 25kHz
Rozsahy S ultralow sondou Nízký rozsah Střední rozsah Vysoký rozsah	10 μ T 3 mT 0,03 T 0,3 T
Rozlišení S ultralow sondou Nízký rozsah Střední rozsah Vysoký rozsah	10 nT 1 μ T 10 μ T 100 μ T
Display	LCD 3 $\frac{2}{3}$ digit
Jednotky	Gauss, Tesla, A/m

Tab.4 Parametry low field sondy MOS51-3204[16]

A	B	C	Linearita	Citlivost	Teplotní rozsah	Teplotní stabilita nuly	Frekvenční rozsah
101,6 mm	6,6 mm	1,27 mm	0,75%/100 μ T	1X	0 - 75°C	± 2 nT/°C	DC – 700Hz

8.2 Měřicí přípravek

Pro měření byl zkonstruován přípravek pro uchycení sondy (měřicího přístroje) v horizontální i vertikální poloze. Přípravek byl zkonstruován z diamagnetických materiálů (dřevo, hliník, nerezová ocel, plast), aby byl zaručen minimální vliv přípravku na samotné měření. Sonda je v tomto přípravku polohovatelná s určením pozice na ± 5 mm.



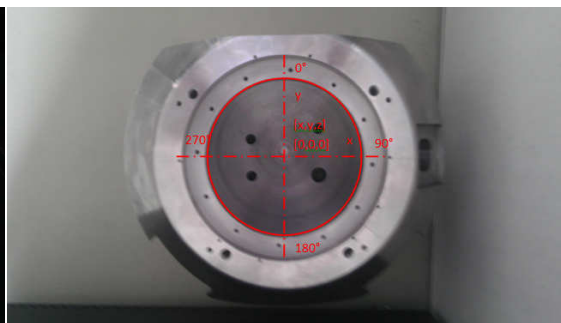
Obr. 8.1, 8.2 Měřicí přípravek

8.3 Měřený objekt

Komory typu EVO jsou používány pro rastrovací elektronové mikroskopy, které jsou stěžejní pro vývoj a výzkum nejen v medicíně, biomedicíně, mechanice, ale i v materiálovém výzkumu. Tato komora je ocelový obrobek, zajišťující stínění před vnějším magnetickým polem. Vzhledem k tomu, že se jedná o rotační osově souměrný objekt, byl souřadnicový systém měřicího přípravku vztažen ke středu na dně komory dle obrázku 8.4. Další informace o magnetických vlastnostech se nacházejí v literatuře. [20]



Obr. 8.3 Stínící komora

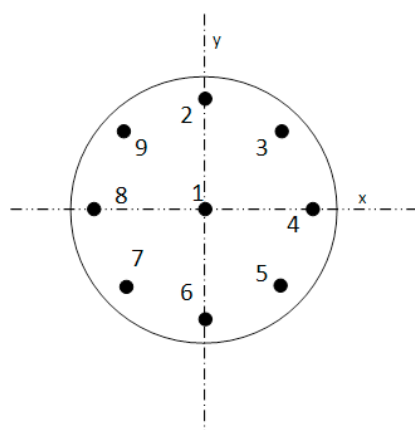


Obr. 8.4 Vztažení souřadnicového systému

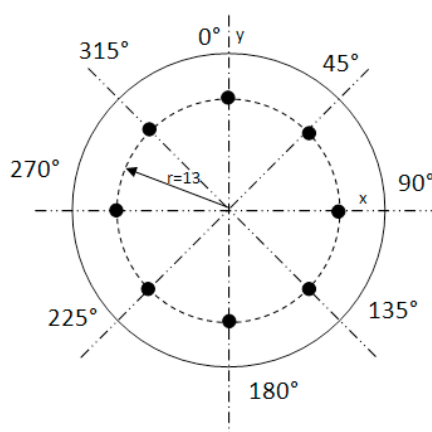
8.4 Měření

8.4.1 Měřicí body, postup měření

Aby bylo možné porovnání hodnot bylo pro měření zvoleno několik vztažných bodů (pozic sondy) ve kterých byly prováděny všechna měření. Pro vertikální uchycení sondy to byly body 1-9, v každém bodě byla sonda zvedána po 2 cm od vztažné roviny (dno komory). Rozmístění měřících bodů viz obrázek 8.5. Pro horizontální uchycení sondy leží body na kružnici o poloměru 13 cm (9 cm), každý bod byl od předešlého vzdálen 45°. Sonda byla také zvedána po 2 cm. Rozmístění měřících bodů viz obrázek 8.6.



Obr. 8.5 Vztažné body vertikální

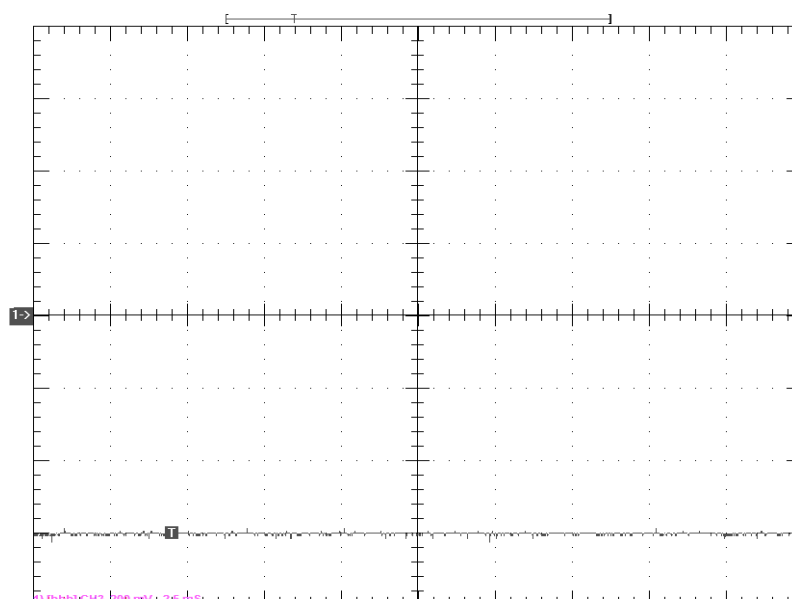


Obr. 8.6 Vztažné body horizontální

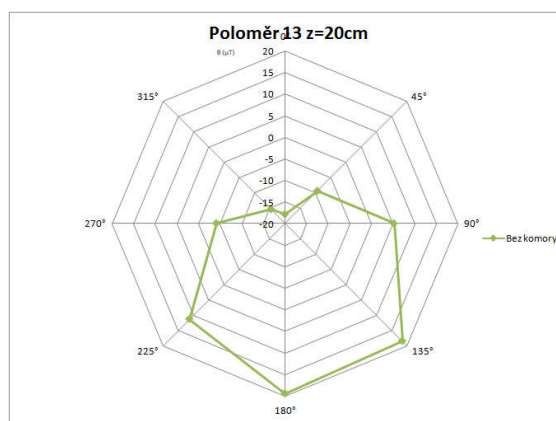
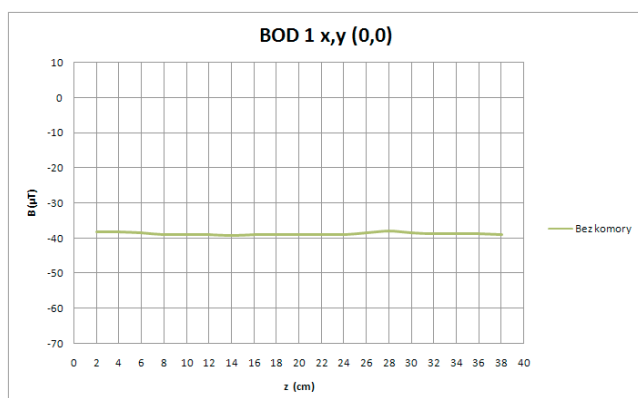
8.4.2 Měření rozložení pole bez komory (jen přípravek)

Nejprve bylo nutné změřit magnetické pole v okolí přípravku a tím také vyloučit jeho vliv na samotné měření. Magnetické pole v okolí přípravku je fakticky magnetickým polem země s případnými vnějšími složkami způsobenými silovým rozvodem střídavého proudu a jiným rušením. V okolí laboratoře magnetických měření se nenachází žádný větší rozvod stejnosměrného proudu, proto výskyt stejnosměrné složky můžeme vyloučit. Pro zjištění vnějšího šumu byl měřicí přístroj připojen na osciloskop a změřen průběh magnetické indukce v závislosti na čase, průběh je vidět na obrázku 8.6. Převod sondy je $1\mu\text{T}\approx 10\text{mV}$.

Magnetické pole bylo tedy změřeno v referenčních bodech. Z naměřených hodnot byla vyobrazena závislost magnetické indukce na souřadnici Z (výšce sondy). Na obrázku 8.7 je pouze příklad naměřené závislosti v bodě 1. Závislost pro horizontální pozici sondy je na obrázku 8.8. Tabulky naměřených hodnot a grafy se nacházejí v příloze na CD.



Obr. 8.6 Průběh magnetické indukce bez komory (rušení) $Z=10\text{cm}$

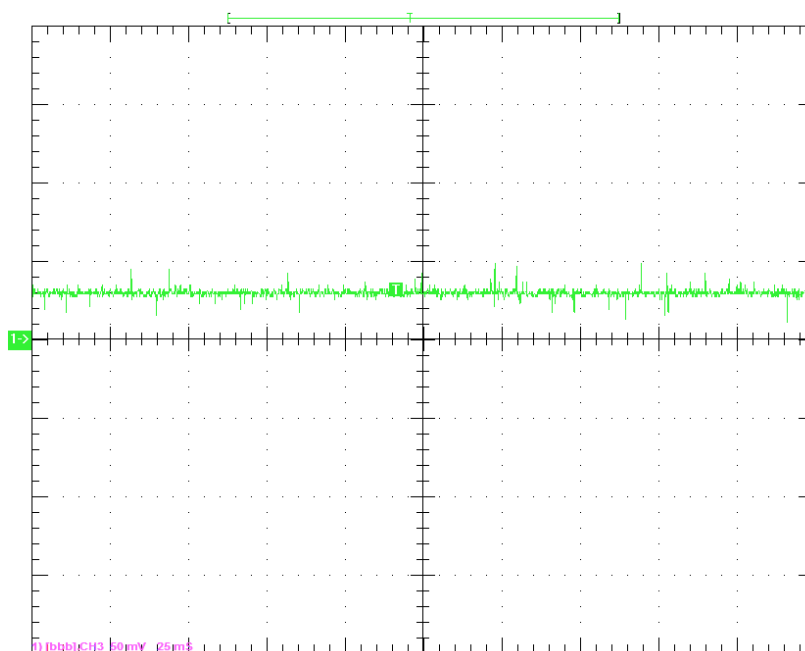


Obr. 8.7 Závislost magnetické indukce v bodě 1 na souřadnici Z

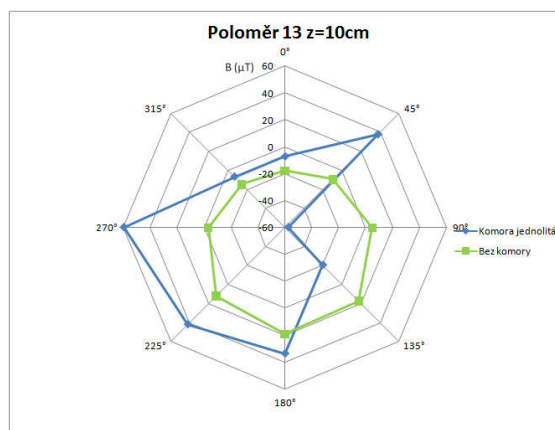
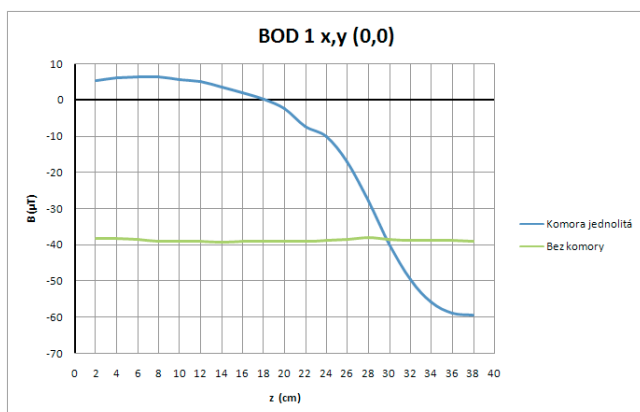
Obr. 8.8 Závislost magnetické indukce ve výšce 20 cm na natočení sondy

8.4.3 Měření rozložení pole na jednolitě komoře

Tento typ komory je jak už sám název napovídá, vyrobený z jednoho kusu materiálu. Komoř byla opět měřena v referenčních bodech, pro lepší zmapování při horizontálních měřeních na poloměrech 13 a 9cm. Na obrázcích 8.9, 8.10 a 8.11 jsou opět příklady změřených průběhů, zbylé průběhy se nacházejí na CD.



Obr. 8.9 Průběh magnetické indukce v jednolitě komoře (rušení)- $Z=10\text{cm}$

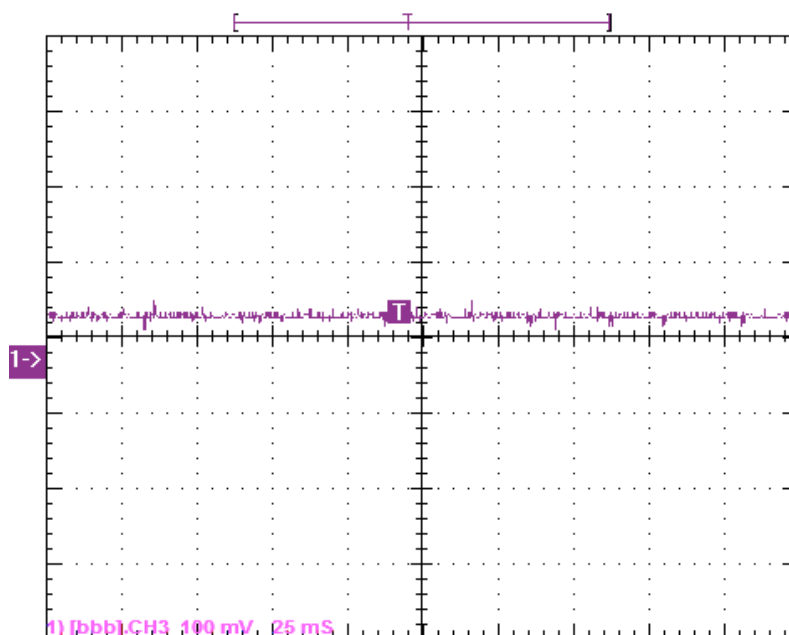


Obr. 8.10 Závislost magnetické indukce v bodě 1 na souřadnici Z jednolitě komory

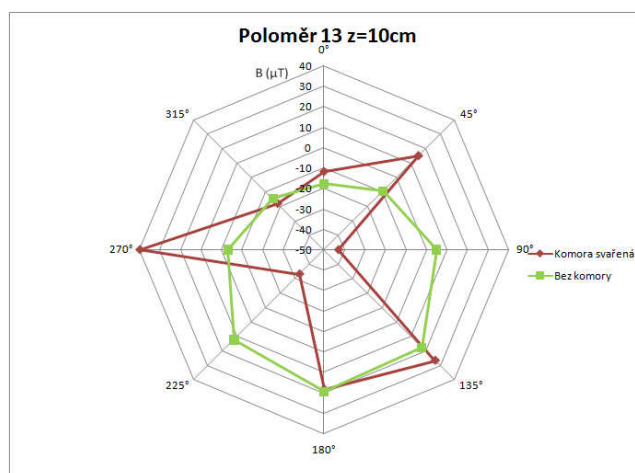
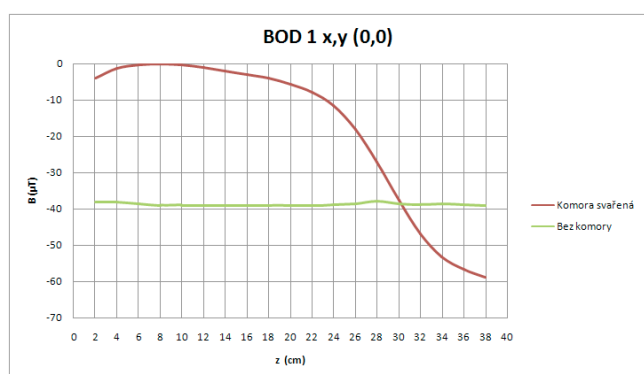
Obr. 8.11 Závislost magnetické indukce ve výšce 10 cm na natočení sondy u jednolitě komory

8.4.4 Měření rozložení pole na svařené komoře, porovnání komor

Druhý typ komory je svařený z více kusů, v toto měření má za úkol zjistit jaké vlastnosti má tato stínící komora, zdali například svary neovlivňují rozložení magnetického pole. Na obrázcích 8.12 až 8.16 jsou opět příklady změřených průběhů, zbylé průběhy se nacházejí na CD.

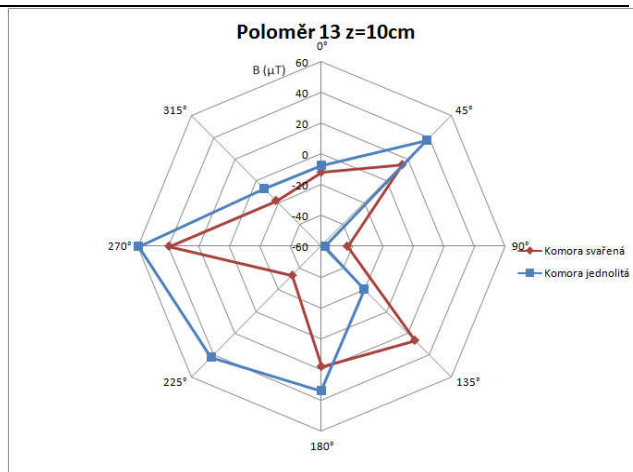
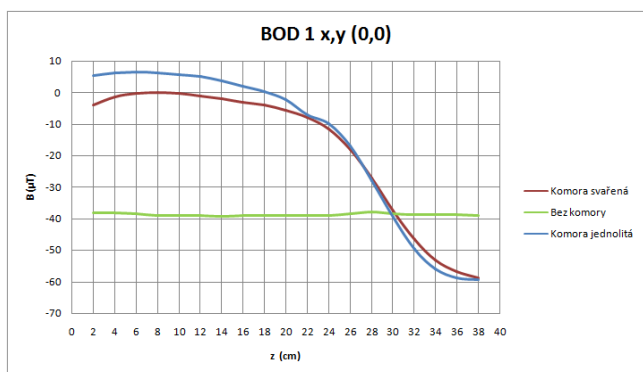


Obr. 8.12 Průběh magnetické indukce v svařované komoře (rušení)- $Z=10\text{cm}$



Obr. 8.13 Závislost magnetické indukce v bodě 1 na souřadnici Z svařené komory

Obr. 8.14 Závislost magnetické indukce ve výšce 10 cm na natočení sondy u svařované komory



Obr. 8.15 Porovnání závislosti magnetické indukce na souřadnici Z u svařované a jednolitě komory

Obr. 8.16 Porovnání závislosti magnetické indukce ve výšce 10 cm na natočení sondy u svařované a jednolitě komory

8.5 Zhodnocení

8.5.1 Měření rozložení pole bez komory (jen přípravek)

Magnetické pole země by v našich zeměpisných podmínkách mělo mít hodnotu vertikální složky kolem $40\mu\text{T}$ a hodnotu horizontální kolem $20\mu\text{T}$ [11], což se potvrdilo i při tomto měření, drobné výkyvy jsou způsobeny spíše nahodilými chybami v měření, z tohoto měření se dále potvrdilo, že měřicí přípravek nezkresluje hodnoty magnetického pole. Hodnoty z tohoto měření byly brány jako referenční a pro porovnání byly vloženy do dalších grafů.

8.5.2 Měření rozložení pole na jednolitě komoře

Při měření bylo nasbíráno přes 260 hodnot magnetického pole a souřadnic. Z vyobrazených grafů vertikálního měření (viz např. obr. 8.10) je viditelné, že komora se chová k vnějšímu magnetickému poli obdobně jako je na obr. (7.3), to znamená, že magnetické pole je vtahováno do komory v jejích vrchních částech – což způsobuje zesílení magnetické indukce k hodnotám vyšším než je zemské pole. Pole je poté vedeno stěnami komory, což způsobuje oslabení indukce uvnitř komory. Nenaplnil se však předpoklad, že nejnižší hodnota magnetické indukce se bude nacházet těsně nad dnem komory, „nula“ magnetické indukce se nacházela zhruba ve výšce 15 cm ode dna komory. Hodnota indukce pole uvnitř komory (odstíněného pole) činila průměrně $5\mu\text{T}$. Toto pole je však v měřících bodech 7, 8, 9 značně nehomogenní.

Z grafů pro horizontální měření je vidět značná deformace magnetického pole uvnitř komory oproti magnetickému poli Země. Z průběhů není možné jasně určit zdali se jedná o vnější pole ovlivněné stínícími vlastnostmi komory, nebo zdali se jedná o magnetické pole vyvolané magnetizační historií materiálu. Značný vliv na rozložení magnetického pole a velikosti indukce mají montážní otvory na stínící komoře viz obrázek (8.3)

8.5.3 Porovnání stínících vlastností komor

Toto měření mělo za úkol, porovnat rozložení magnetického pole u dvou stínících komor typově stejných, avšak různé výrobní technologie. Jak je zmíněno výše, komora je svařovaná ze dvou kusů. Měření mělo zjistit zdali technologie svařování a svary mají vliv na rozložení magnetického pole uvnitř komory.

Předpokládalo se, že stínící komory budou mít velmi podobné rozložení magnetického pole. Tento předpoklad se však při měření nepotvrdil. Hodnoty magnetické indukce uvnitř komory jsou značně rozdílné téměř ve všech měřících bodech.

9 Závěr

Tato bakalářská práce byla řešena v rámci grantového projektu Ministerstva průmyslu a obchodu č. FR-TI1/334: Implementace inovací prostřednictvím výzkumu do moderních typů komor elektronových mikroskopů za účelem posílení pozice a konkurenceschopnosti ČR na světovém trhu - IPV.

Přínos této práce vidím jednak v teoretické části, kterou jsem pojal jako stručnou rešerši problematiky měření magnetických polí a jejich stínění, dále v samotném měření, při kterém bylo nutno zkonstruovat prototyp přípravku, který je dále použitelný pro další měření na těchto komorách, ale i obecně k jiným měřením. V poslední řadě jsou to naměřené hodnoty a grafy z měření, které popisují rozložení magnetického pole uvnitř stínící komory.

Ze zkušeností z měření, vidím možné zlepšení v případném použití jiného měřicího přístroje. Vhodným přístrojem se zdá být magnetometr na Hallově principu, měřící na stejných rozsazích jako mnou použitý přístroj, avšak všechny tři složky vektoru magnetické indukce. Nebo použití „bodového“ senzoru, se kterým by se díky jeho malé velikosti dala bez omezení proměřit celá komora. Dále by bylo vhodné změřit magnetické pole jen komory samotné, to znamená, jen pole vyvolané magnetizací materiálu. Pro tento účel je však nutná stínící komora relativně velkých rozměrů. Měření samotné bylo velmi časově náročné, pro proměření dostatečného počtu hodnot bylo zapotřebí přesného nastavování přípravku, možnost zlepšení je tedy zřejmá, zlepšení mechanismu nastavení polohy sondy a případné propojení do PC přes měřicí kartu. S těmito úpravami by bylo možné snadno naměřit a zobrazit 3D model rozložení magnetického pole. Dalším návrhem je zjištění stínících vlastností komory vůči vnějšímu magnetickému poli o vyšší intenzitě. Toto pole by mohlo být realizováno např. Helmholtzovými cívkami. Tyto návrhy jsou však velmi časově a finančně náročné a zdaleka přesahují náplň a rozsah této práce.

10 Seznam použité literatury

- [1] MYSLÍK, Jirí. *Elektromagnetické pole - základy teorie*. 1. vyd. Praha: BEN - Technická literatura, 1998. 160 s. ISBN 80-86056-43-0.
- [2] DRAXLER, Karel. KAŠPAR, Petr. RIPKA, Pavel. *Magnetické prvky a měření*. 3. vyd. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008. 276 s. ISBN 978-80-01-03970-0.
- [3] RIPKA, Pavel. TIPEK, Alois. *Modern Sensors Handbook*. 1. vyd. Londýn: iSTE, 2007. 510 s. ISBN 978-1-905209-66-8.
- [4] RIPKA, Pavel. *Magnetic Sensors and Magnetometers*. 1. vyd. Londýn: Artech House, 2001. 494 s. ISBN 1-58053-057-5.
- [5] DĚDEK, Libor. *Teorie Elektromagnetického pole*. 1. vyd. Brno: Ediční středisko VUT, 1990. 218 s. ISBN 80-214-0219-9
- [6] WEBSTER, John. *Measurement Instrumentation And Sensors Handbook*. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-2145-X.
- [7] TONG, Xincung. *Advanced Materials and Desing for Electromagnetic Interference Shielding*. 1. vyd. New York: CRC Press, 2009. 323 s. ISBN 978-1-4200-7358-4.
- [8] DRÁPALA, Jaromír. *Skriptum k předmětu Elektrotechnické materiály*. Ostrava: VŠB-TU, 2009.
- [9] KAŠPAR, Petr. *Měření slabých magnetických polí a jejich stínění* [online]. c2005, poslední revize 18.11.2008 [cit. 2011-11-22].
Dostupné z: <
http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38mpm/mereni_a_stineni_sl_poli.pdf
>
- [10] *Stacionární magnetické pole* [online]. c2008, poslední revize 11.4.2009 [cit. 2011-10-25].
Dostupné z: < <http://www.e-fyzika.cz/kapitoly/01-stacionarni-magneticke-pole.pdf>>
- [11] RIPKA, Pavel. *Přesné magnetické snímače a jejich aplikace* [online]. c2010, poslední revize 2.6.2010 [cit. 2011-10-25].
Dostupné z: < <http://www.crr.vutbr.cz/kurzy-seminare/merici-systemy/seminar-presne-magneticke-snimace-jejich-aplikace#attachments>>
- [12] VYBÍRAL, Bohumil. *Magnetické pole v látce (elektrodynamika II.)* [online]. c2007, poslední revize 12.2.2011 [cit. 2011-11-3].
Dostupné z: < <http://kubaz.cz/mathpedie/fyzika/>>
- [13] *Guidelines for instaling magnetic shielding*. Less EMF Inc. 2006. 3s.
- [14] VOPÁLENSKÝ, Michal. RIPKA, Pavel. *Magnetorezistivní senzory. Slaboproudý obzor*, 2002, roč. 59, č 2, s. 6–12.
- [15] KIREŠ, Marián. *Magnetické pole zeme* [online]. c2001, poslední revize 9.2.2001 [cit. 2011-10-23].
Dostupné z: < <http://physedu.science.upjs.sk/sis/fyzika/ucebnetexty/doplňkove/magpole/01.htm>>
- [16] U.S. EPA *Geomagnetic field* [online], poslední revize 12.12.2011 [cit. 2011-10-23].
Dostupné z: <
http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/properties/Magnetic_Susceptibility/Geomagnetic_Field.htm
>

[17] Wikipedia EPA *Earth's magnetic field* [online], poslední revize 6.4.2012 [cit. 2011-11-29].

Dostupné z: < http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_magnetic_field >

[17] *5100 datasheet*. F.W Bell. 2010. 2s.

[18] *5100 probes datasheet*. F.W Bell. 2010. 1s.

[19] DELONG, A., FRANK, L., KNOR, Z., KOLAŘIK, V.,: Metody analýzy povrchů, elektronová mikroskopie a difrakce. Academia, Praha, 1996

[20] Marek M., Holčáková R., Režnar J.: Innovative Research in Electron Microscopes, Magnetic Properties of Steels and Alloys for Magnetic Lenses and Chambers, 10th IEEEIC2011, Roma, Itali, 8-11 May.

[21] MAREK. M.: Recognition methods of magnetic properties of the construction materials, specific examples of using and applications of the magnetic measuring., dissertation thesis, VŠB-TU Ostrava, 2005

.

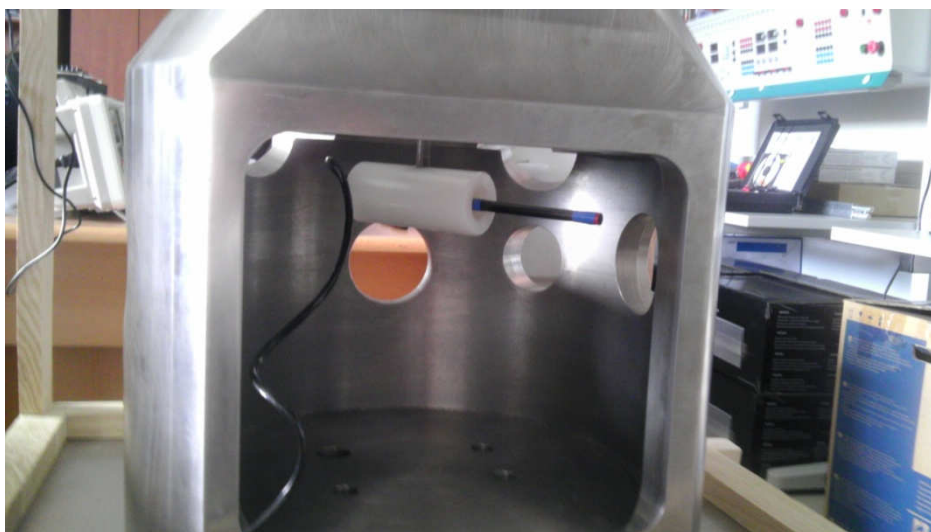
11 Seznam příloh

Příloha I	–	Ukázka horizontálního uchycení sondy
Příloha II	–	Měřicí přípravek
Příloha III	–	Detail svařované komory
Příloha IV	–	Detail svařované komory 2

Obsah digitálních příloh

A	Tabulky naměřených hodnot
B	Změřené závislosti magnetické indukce pro všechny 3 body měření

Příloha I



Příloha II



Příloha III



Příloha IV

